

激光与光电子学进展

激光冲击处理对 GH3039 高温拉伸性能的影响

项建云¹, 葛茂忠^{2*}, 王太明³¹常州工业职业技术学院现代装备制造学院, 江苏 常州 213164;²江苏理工学院材料工程学院, 江苏 常州 213001;³中国航发常州兰翔机械有限责任公司, 江苏 常州 213022

摘要 为了研究激光冲击处理 GH3039 高温合金的高温拉伸性能, 采用高能激光束对 GH3039 高温合金试样进行冲击处理, 对比分析了温度为 600 °C 时不同保温时间下激光冲击处理 GH3039 的表面残余应力的松弛行为, 研究了保温 5 h 后激光冲击处理 GH3039 的晶粒尺寸变化特性以及激光冲击前后 GH3039 的高温拉伸性能和断口。结果表明: 经激光冲击处理后, GH3039 表层晶粒显著细化, 冲击区域表层 1.7 mm 深度范围内的应力为残余压应力。600 °C 下保温 5 h 后, 激光冲击处理 GH3039 的晶粒平均尺寸由 20.5 μm 增大到 28.8 μm, 但远小于母材晶粒平均尺寸 47.9 μm; 随着保温时间的延长, 激光冲击处理 GH3039 的表面残余应力的松弛速率呈持续下降趋势; 相比于母材, 600 °C 下激光冲击试样的平均极限抗拉强度提升了 7.9%, 这归因于激光冲击处理诱导的晶粒细化和残余压应力。

关键词 材料; 激光冲击处理; GH3039 高温合金; 残余应力热松弛; 高温拉伸性能

中图分类号 TN249; TG115.5; TG146.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0716002

Effect of Laser Shock Peening on High-Temperature Tensile Property of GH3039 Superalloy

Xiang Jianyun¹, Ge Maozhong^{2*}, Wang Taiming³

¹*School of Modern Equipment Manufacturing, Changzhou Institute of Industry Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China;*

²*School of Material Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China;*

³*AECC Changzhou Lanxiang Machinery Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213022, China*

Abstract In order to study the high-temperature tensile properties of GH3039 superalloy treated by laser shock peening (LSP), the GH3039 superalloy samples are first peened by a high-energy laser beam. Then, the relaxation behavior of residual stress on the surface of LSP GH3039 after exposure at 600 °C for different time, the change in grain size of LSP GH3039 after exposure at 600 °C for 5 h, and the high-temperature tensile properties and fractures of GH3039 before and after LSP are compared and analyzed. The results show that after LSP impact, the grains in the near surface of GH3039 are significantly refined, and the residual compressive stress is found in the surface layer of the impact area at a depth of around 1.7 mm. After exposure at 600 °C for 5 h, the average grain size of LSP GH3039 increases from 20.5 μm to 28.8 μm, much smaller than the average grain size (47.9 μm) of the base metal. With the increase of exposure time, the relaxation rate of the surface residual stress of LSP GH3039 decreases, which shows a continuous decreasing trend. Compared with that of the base metal, the average ultimate tensile strength of the laser treated sample at 600 °C increases by 7.9%, which is attributed to grain refinement and residual compressive stress induced by laser impact treatment.

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-06-19; 录用日期: 2021-07-05

基金项目: 江苏省科技成果转化项目(BA2018070)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20151171)

通信作者: *gmzxjy@163.com

Key words materials; laser shock processing; GH3039 superalloy; thermal relaxation of residual stress; high-temperature tensile property

1 引言

GH3039 作为一种镍基高温合金,不仅具有优异的力学性能,还具有良好的加工性能,因此被广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端零件制作中^[1]。目前,采用 GH3039 高温合金制作的某型航空发动机涡轮导向器,在 600 °C 工作时,出现裂纹,严重影响飞机的飞行安全。在导向器材料和结构保持不变的前提下,选用全新的表面改性技术代替传统的机械喷丸技术以进一步改善 GH3039 高温合金的力学性能是当务之急。

作为一种新型的表面改性技术,激光冲击处理(LSP)利用高功率、短脉冲的强激光辐照金属材料表面,形成的高压冲击波使材料表层发生超高应变率的塑性变形,材料表层的晶粒细化,残余应力状态发生改变,从而提升材料的力学性能^[2-3]。目前,已有学者开展了激光冲击强化高温合金的试验研究^[4-8]。Ren 等^[4]通过试验和模拟相结合的方式,开展了激光冲击处理对铁基高温合金 GH2036 的表面粗糙度、显微硬度和微观结构的影响研究。Kattoura 等^[5]开展了激光冲击处理对 ATI718 高温合金的微观结构、残余应力和疲劳寿命的影响研究。Amini 等^[6]研究了光斑大小、激光冲击次数和激光脉冲能量对 Incoloy800 高温合金的疲劳寿命和显微硬度的影响。Zhou 等^[7]研究了激光冲击处理对 GH4133B 高温合金的高温疲劳寿命的影响。Cao

等^[8]探讨了激光冲击处理对镍基高温合金 GH202 的微观结构和热腐蚀抗力的影响规律。汤洋等^[9-10]开展了激光冲击处理对 GH3039 的表面完整性和室温疲劳寿命的影响研究。但有关激光冲击强化 GH3039 的高温拉伸性能的研究鲜有报道。

因此,本文以冷轧 GH3039 高温合金板材为研究对象,采用优化的激光工艺参数对试样进行激光冲击处理,探讨了 600 °C 服役环境下经历不同保温时间后激光冲击处理 GH3039 的表面残余应力的热松弛行为以及保温 5 h 后激光冲击处理 GH3039 的晶粒尺寸的变化特性。通过对比分析激光冲击前后高温拉伸试样的断口形貌和应力-应变曲线,揭示了激光冲击处理对 GH3039 的高温拉伸性能的影响规律,为某型航空发动机关键结构件的激光冲击强化处理提供依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料采用中国航发常州兰翔机械有限责任公司提供的厚度为 2 mm 的冷轧板,供货时为固溶处理状态,GH3039 高温合金的化学组成如表 1 所示。高温拉伸试样的形状和尺寸如图 1(a)所示,激光冲击试样如图 1(b)所示。高温拉伸试样的制作过程如下:先采用线切割机床加工,再用金相砂纸打磨侧面,保证侧面粗糙度为 0.8 μm,紧接着用丙酮超声清洗,最后用冷风吹干。残余应力试样的制

表 1 GH3039 的化学组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH3039 (mass fraction, %)

Composition	C	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Mn	Si	Fe	P	S	Ni
Value	≤0.080	19.000-22.000	1.800-2.300	0.350-0.750	0.350-0.750	0.900-1.300	0.400	0.800	≤3.000	0.020	0.012	Bal.

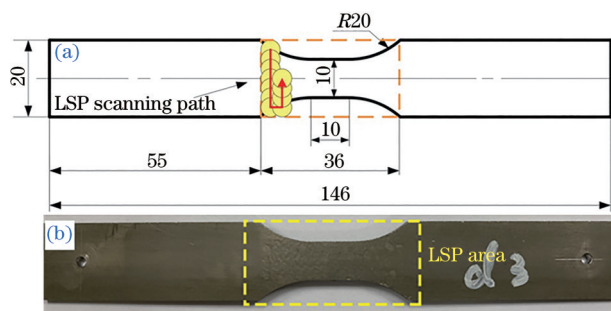


图 1 高温拉伸试样。(a)形状;(b)实物

Fig. 1 High-temperature tension specimen. (a) Dimension; (b) real picture

作过程如下:先采用线切割机床在激光冲击区域加工出尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的试样,再用丙酮清洗,最后风干。残余应力热松弛试样的尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,制备时先采用线切割加工,接着抛光表面,最后去脂清洗。

2.2 激光冲击处理

激光加工参数如表 2 所示。选用经反渗透膜过滤的 2 mm 厚的流水作为约束层,选用 0.1 mm 厚的黑胶带作为吸收层^[9]。激光扫描方向与高温拉伸试样的长度方向垂直。激光冲击结束后,去除黑胶带,并用丙酮清洗激光冲击试样表面,再用冷风吹干^[9]。

表 2 激光加工参数

Table 2 Laser process parameters

Parameter	Value
Pulse energy / J	8
Laser pulse width / ns	16
Laser wavelength / nm	1053
Spot diameter / mm	3
Overlapping rate / %	50

2.3 测量设备

采用德国蔡司公司研制的 ZEISS Primotech 光学显微镜观测 GH3039 高温合金的微观结构。采用河北邯郸爱斯特应力技术公司研制的 XL-640 型 X 射线应力仪测量试样表层的残余应力。利用德国蔡司公司研制的 SIGMA500 型高分辨率场发射扫

面电镜观察激光冲击前后试样拉伸断口的形貌,配合使用能谱仪(EDS)分析其不同区域的成分。

2.4 高温拉伸试验

高温拉伸试验采用德国 ZWICK 公司生产的 Z250 型电子万能材料试验机。根据导向器的服役环境,将试验温度设定为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。以 $10^{-3}/\text{s}$ 的应变速率进行高温拉伸试验,采用引伸计采集试样的应变数据,并绘制应力-应变曲线。

3 试验结果与分析

3.1 微观结构分析

室温下 GH3039 激光冲击前后的微观结构如图 2 所示。采用 Image pro-plus 6.0 图像分析软件测量晶粒的大小。可以看出,在室温下,激光冲击前后 GH3039 高温合金的平均晶粒大小分别为 $47.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20.5\text{ }\mu\text{m}$ 。与母材相比,激光冲击处理 GH3039 的晶粒大小降幅为 57.2%,这说明激光冲击处理实现了 GH3039 高温合金的晶粒细化。这是由于当高能激光束辐照靶材表面时,能量吸收层和水约束层的协同作用诱导产生高压冲击波,并向靶材内部传播,当冲击波的峰值应力超过靶材动态屈服极限时,靶材发生超高应变率的强烈塑性变形,位错滑移和攀移被全面激活,晶粒内部出现高密度的位错缠结、位错胞和位错网等结构,位错缠结通过不断吸收位错,逐步转化为亚晶界和晶界,从而实现靶材晶粒的细化^[2-3]。

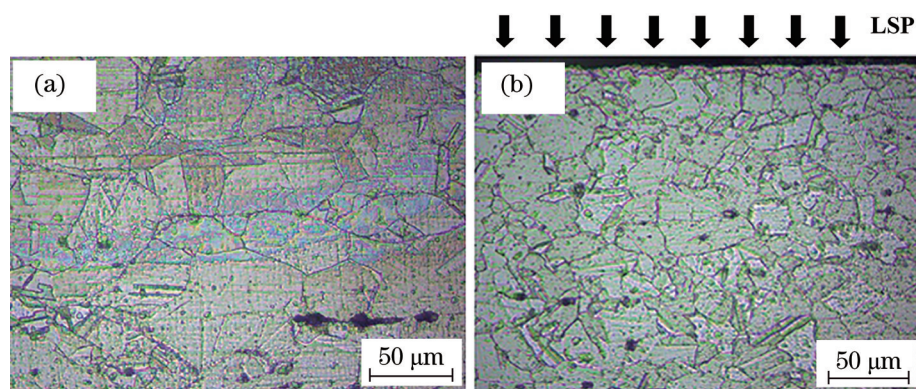


图 2 室温下激光冲击前后 GH3039 高温合金的微观结构。(a)母材;(b)激光冲击试样

Fig. 2 Microstructures of GH3039 supe alloy before and after LSP at room temperature. (a) Base metal; (b) LSP sample

在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下,保温 5 h 后,激光冲击处理 GH3039 的微观结构如图 3 所示。从图 3 可知:激光冲击处理 GH3039 的平均晶粒大小为 $28.8\text{ }\mu\text{m}$ 。与室温下激光冲击处理 GH3039 试样相比,晶粒有所增大。这是由于在长时间高温作用下,原子活性增强,位错可动性增大,位错从高能态向低能态转变,位错缠结

逐步伸展开,位错密度相应减小,材料内部出现动态再结晶(再结晶温度为 $0.4T_m$ 左右,其中 T_m 为试验材料的熔点,单位为 K。由于 GH3039 熔点为 $1420\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,故 GH3039 再结晶的温度范围为 $385.8\sim 404.2\text{ }^\circ\text{C}$),晶粒尺寸增大^[11]。但与 GH3039 母材相比,保温后的激光冲击试样的晶粒尺寸依旧细小。

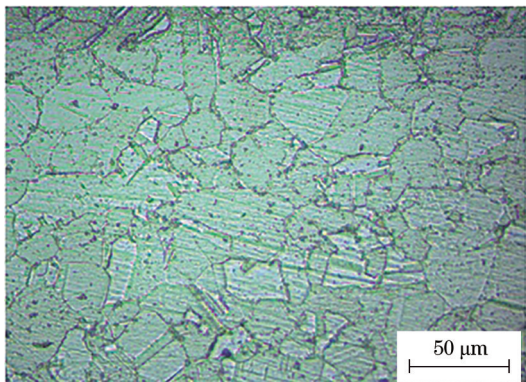


图3 600 °C下保温5 h后激光冲击处理GH3039的微观结构
Fig. 3 Microstructure of LSP GH3039 after exposure at 600 °C for 5 h

3.2 残余应力分布分析

图4为激光冲击前后GH3039高温合金的表层残余应力分布变化情况。从图4可知,激光冲击前, GH3039高温合金的表层残余应力为拉应力,在试样表层1.8 mm深度范围内,残余拉应力平均值的变化范围为29.5~70.2 MPa;而激光冲击后,试样表层的残余应力由拉应力转变为压应力。在距离激光冲击表面1.7 mm范围内,残余压应力的平均值由表面的-538.2 MPa逐步减小到-30.6 MPa。在距离激光冲击表面1.8 mm截面处,残余应力为拉应力,其平均值为20.8 MPa。激光冲击处理GH3039产生残余压应力的机理如下:在激光和GH3039板材相互作用时,激光诱导的强冲击波使GH3039板材表层材料发生剧烈的塑性变形,而周边材料发生弹性变形;当激光冲击结束后,由于塑性变形层阻挡了周边弹性变形材料的弹性回复,因此在激光冲击区域的材料表层产生了残余压应力^[2]。测试结果表明:最大残余压应力位于GH3039

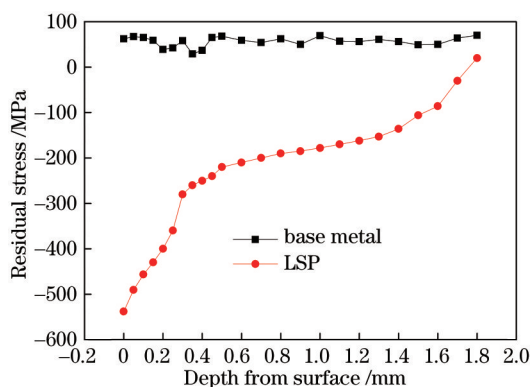


图4 激光冲击前后GH3039高温合金的表层残余应力分布
Fig. 4 Residual stress distributions in surface layer of GH3039 superalloy before and after LSP

板材表面,且随着测量面远离激光冲击表面,残余压应力不断减小,最后残余压应力消失。这是由于激光束辐照GH3039板材表面时,激光诱导产生高压冲击波,该冲击波作用于GH3039板材表面并向内传播。由于作用于GH3039板材表面的冲击波压力最大,故塑性变形程度最剧烈。随着传播距离的不断增加,冲击波压力不断减小,材料相应的塑性变形也不断减小。当冲击波的压力低于材料的动态屈服强度时,材料就不会发生塑性变形,因此,材料相应截面上也就不会产生残余压应力。

3.3 残余应力的热松弛

当温度为600 °C时,保温不同时间,再经空冷后测定的激光冲击处理GH3039的表面残余应力如表3所示。由表3可知,试样经过0.5,1,5,10 h保温后,试样表面残余压应力的平均值分别为-461.1, -441.9, -422.7, -385.3 MPa,试样表面残余压应力的松弛速度大小分别为2.6, 1.6, 0.4, 0.3 MPa/min。与热处理前相比(-538.2 MPa),残余压应力降幅分别为14.3%、17.8%、21.4%和28.4%。由此可知,在前1 h内,残余应力的松弛速度非常快,随后残余应力的松弛速度变慢。特别是在5~10 h范围内,残余应力的松弛幅度很小,这说明随着保温时间的延长,残余应力基本保持恒定。这是由于在高温环境下, GH3039高温合金发生高温软化,其屈服强度下降,打破了试样内部屈服强度与残余应力相等的平衡状态,故只有通过残余应力松弛才能建立新的内部平衡^[11]。

表3 当温度为600 °C时激光冲击处理GH3039的残余应力的热松弛

Table 3 Thermal relaxation of residual stress in LSP GH3039 at 600 °C

Holding time /h	0.5	1	5	10
Surface residual stress /MPa	-461.1	-441.9	-422.7	-385.3

3.4 高温拉伸性能分析

当试验温度为600 °C,应变速率为 10^{-3} /s时, GH3039高温合金的拉伸试验结果如表4所示,其中B1、B2及B3分别表示母材1、母材2和母材3, LSP1、LSP2和LSP3分别表示激光冲击试样1、试样2和试样3。由表4可知,未冲击试样的平均抗拉强度为653.3 MPa,平均延伸率为51.6%;试样经激光冲击处理后,平均抗拉强度为705 MPa,增幅为7.9%,平均延伸率为49%,降幅为5.0%。由此可

表 4 当温度为 600 °C 时 GH3039 的拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of GH3039 at 600 °C

Performance	Before LSP			After LSP		
	B1	B2	B3	LSP1	LSP2	LSP3
Ultimate tensile strength /MPa	660.3	652.7	646.9	697.2	717.8	700.1
Elongation /%	50.8	51.4	52.5	49.6	48.3	49.1

知,相比于原始试样,激光冲击处理增强了 GH3039 在高温环境下的抗拉强度,降低了其塑性变形能力。

图 5 给出了当试验温度为 600 °C,应变速率为 10^{-3} /s 时, GH3039 高温合金拉伸试样的应力-应变曲线。对比可知, GH3039 母材和激光冲击试样的应力-应变曲线呈现出大致相同的变化趋势,二者的高温拉伸过程均经历了弹性变形阶段、塑性变形阶段以及颈缩瞬断阶段三个阶段。由图 5 可知,在起始的 0~0.0379 应变区间内,二者都发生了弹性变形,其应力与应变近似成线性变化关系;随着应力的不断增大,当二者的应力值达到屈服强度时,高温拉伸进入塑性变形阶段,此后二者的应力大小随着应变的增加而缓慢增大,塑性变形抵抗力不断增大;当应力值达到最大抗拉强度时,高温拉伸进入颈缩瞬断阶段,断裂导致二者的应力值急剧衰减至零。相比于母材试样,激光冲击试样的名义屈服强度和最大抗拉强度分别提升了 14.3% 和 5.6%,这得益于激光冲击诱导产生的晶粒细化和残余压应力层。由 3.1 和 3.3 节可知,尽管保温处理会导致激光冲击处理 GH3039 的晶粒尺寸增大和残余压应力值减小,但与母材相比,激光冲击处理 GH3039 的晶粒尺寸仍然细小,表层依旧存在残余压应力。此外,二者的应力-应变曲线在塑性变形期均出现

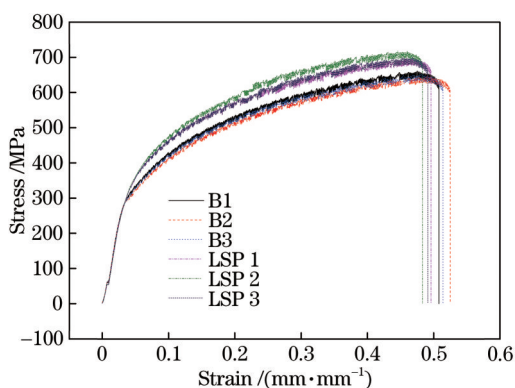


图 5 当温度为 600 °C 时 GH3039 母材和激光冲击试样的拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of GH3039 base metal and LSP sample tested at 600 °C

了锯齿形,这一现象的出现归因于两方面:一是高温有利于溶质原子扩散,析出物的增加对位错滑移起到瞬时阻碍作用^[12];二是高温有利于氧扩散到晶界,引起氧致晶间脆性,对材料起到弱化作用^[13]。在室温下,激光冲击前后 GH3039 高温合金的平均极限抗拉强度分别为 813.5 MPa 与 891.8 MPa。与室温下的性能相比,在 600 °C 高温下, GH3039 高温合金的最大抗拉强度明显减小,这说明高温环境对 GH3039 高温合金的最大抗拉强度产生明显的弱化作用。高温能够有效提升材料内部原子的活性,使晶体内部的位错更容易发生滑移和攀移,材料的塑性变形能力得到提高;晶体内的析出相颗粒对位错运动起到阻碍作用,而高温作用使得位错容易越过析出相粒子而继续运动,导致材料抗拉强度的降低^[12]。另外,激光冲击处理的强化效果也与晶粒大小和残余应力场有关,高温导致材料内部的软化效应会削弱激光冲击诱导的晶粒细化强化作用,而残余应力在高温环境下会出现热松弛现象,两者共同作用使得激光冲击处理的强化效果明显减弱,最终导致激光冲击处理 GH3039 的高温极限抗拉强度显著减小。此外,在激光冲击处理之后, GH3039 的表面粗糙度值由 0.036 μm 增大到 0.048 μm ^[9], GH3039 抗拉强度下降,但由于静载荷对应力集中不敏感,故表面粗糙度对抗拉强度的影响不大。

3.5 高温拉伸断口分析

图 6 为高温拉伸试样断口的 EDS 分析结果。其中,图 6(c)与图 6(d)分别对应图 6(a)中的 C、D 两点,图 6(e)与图 6(f)分别对应图 6(b)中的 E、F 两点。对比图 6(c)与图 6(d)及图 6(e)与图 6(f)可知,在靠近试样表面区域,能谱中出现氧元素,而在远离试样表面区域,能谱中未出现氧元素,说明在高温拉伸过程中, GH3039 板材表面材料由于长时间承受高温作用而发生了氧化反应,生成的氧化物附着在断口表面。

图 7 为高温条件下母材和激光冲击试样的拉伸断口形貌。由图 7 可知,两者断口表面存在大量

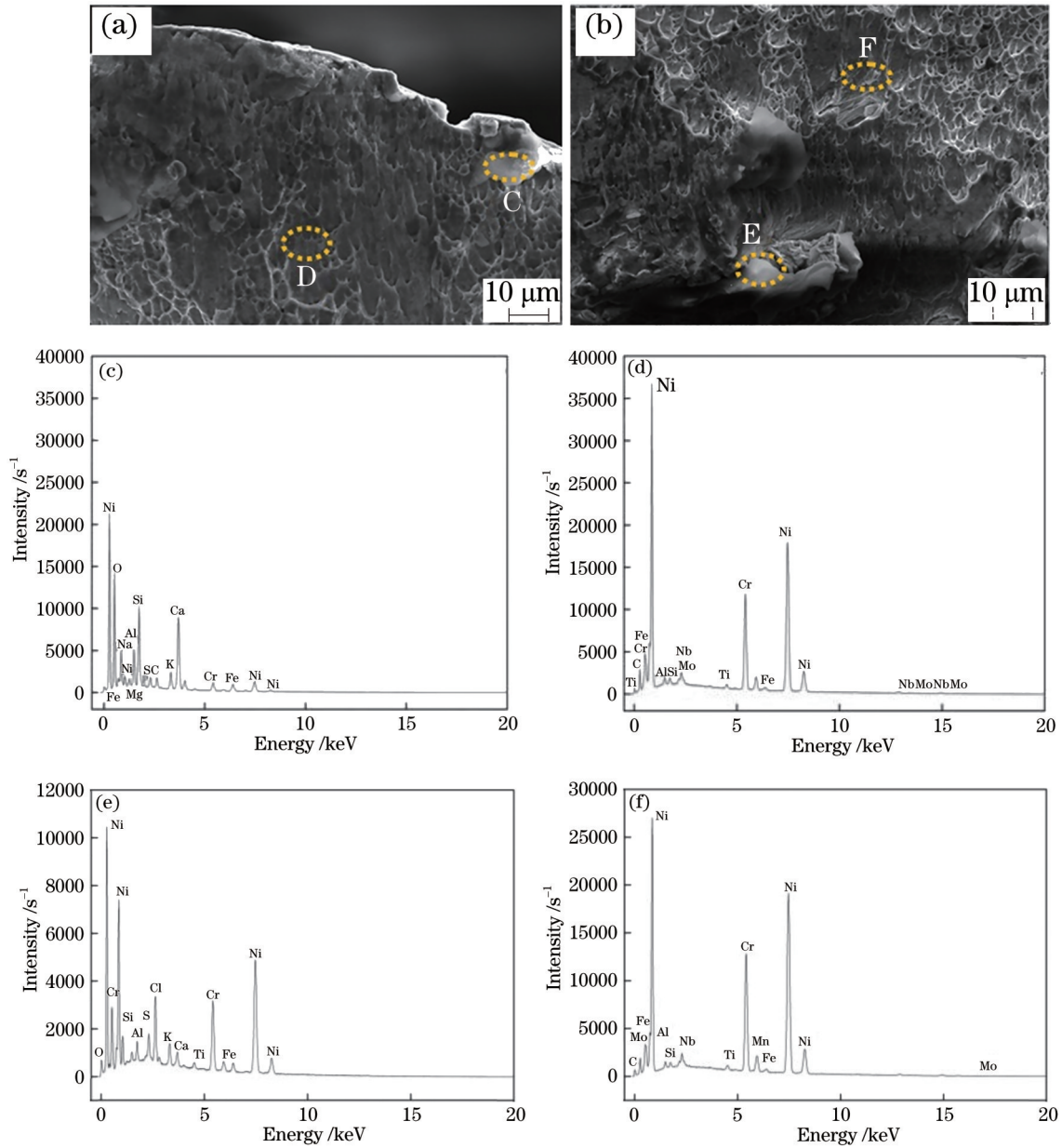


图 6 高温拉伸试样断口的 EDS 分析结果。(a)母材;(b)激光冲击处理试样;(c)图 6(a)中 C 点的分析结果;(d)图 6(a)中 D 点的分析结果;(e)图 6(b)中 E 点的分析结果;(f)图 6(b)中 F 点的分析结果

Fig. 6 EDS analysis results of fracture of high-temperature tensile specimen. (a) Base metal; (b) LSP sample; (c) analysis result of point C in Fig. 6 (a); (d) analysis result of point D in Fig. 6 (a); (e) analysis result of point E in Fig.6 (b); (f) analysis result of point F in Fig.6 (b)

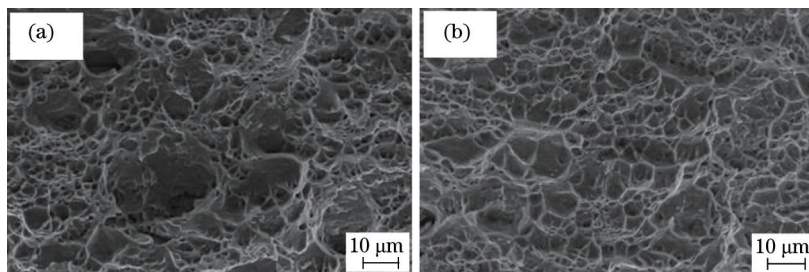


图 7 GH3039 高温拉伸断口的微观形貌:(a)母材;(b)激光冲击试样

Fig. 7 Microstructures of high-temperature tensile fracture of GH3039. (a) Base metal; (b) LSP sample

的等轴韧窝,这是材料发生塑性断裂的典型特征。其形成机制为:当材料受外力作用在微观尺度内发生塑性变形时,材料内部出现微型空洞,在拉应力的持续作用下微型空洞不断地成形、扩张、积聚,最终微型空洞相互连接,导致材料断裂。相比于母材,激光冲击试样断口表面的韧窝直径较小且深度较浅,韧窝尺寸大小较均匀,这得益于激光冲击处理引起的晶粒细化和形变硬化^[2]。形变硬化程度越大,材料越难发生内缩颈,故韧窝尺寸也就越小^[2]。

3.6 高温环境下激光冲击处理 GH3039 的抗拉强度提高机理

激光冲击处理使得 GH3039 表层晶粒细化,晶粒细化层中晶粒内部缺陷较少,晶界面积增大,外加载荷可由更多的晶粒来承担,晶粒内部的应力集中程度减小,材料受力均匀,高温拉伸时不易出现缩颈,从而 GH3039 的高温抗拉强度得到提高^[14]。此外, GH3039 受到外加拉应力的作用时,发生塑性变形,位错一旦滑移到试样表面就会产生滑移台阶,当滑移台阶顶破试样表面的钝化膜时,基体材料直接暴露在高温环境下,氧会扩散到晶界,导致氧致晶间脆性,从而削弱 GH3039 的高温抗拉强度^[14]。而激光诱导的晶粒细化层能够提高位错滑移抗力,阻止试样表面滑移台阶的形成,防止试样表面钝化膜的过早破裂,抑制激光冲击试样氧化腐蚀的过早发生,从而提高 GH3039 的高温抗拉强度^[14]。

在 600 °C 高温环境下,激光冲击处理 GH3039 诱导的残余压应力尽管产生热松弛,但随着保温时间的延长,残余应力的降幅不断减小。在 GH3039 高温拉伸过程中,残余压应力可以在一定程度上抵消部分外加的拉应力,从而降低位错滑移驱动力,抑制微裂纹的产生,进而提高 GH3039 的高温抗拉强度。

4 结 论

根据涡轮导向器的服役温度,对高温下激光冲击前后 GH3039 的微观结构、残余应力、拉伸性能及断口进行了试验研究和理论分析,得出以下结论。

1) 激光冲击处理能够实现 GH3039 高温合金表层的晶粒细化。在 600 °C 温度下,保温 5 h 后,激光冲击处理 GH3039 的平均晶粒尺寸由 20.5 μm 增大到 28.8 μm,增幅为 40.5%。但与母材的平均晶粒尺寸 47.9 μm 相比,晶粒的细化效果仍然明显。

2) 激光冲击处理在 GH3039 高温合金表层诱导产生残余压应力。600 °C 高温将导致激光冲击处理 GH3039 的表面残余压应力松弛。在保温的初期,试样残余压应力的松弛幅度及残余压应力的松弛速率较大;随着保温时间的延长,试样残余压应力的松弛幅度及残余压应力的松弛速率不断减小。

3) 相比于母材,在高温环境下,激光冲击处理 GH3039 的抗拉强度明显高于母材试样。激光冲击强化引起的晶粒细化和残余压应力是 GH3039 高温合金抗拉强度提升的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Wang X H, Zhao C, Guo Y Y, et al. Study on drilling characteristics of supper alloy GH3039[J]. Materials Science Forum, 2014, 800/801: 119-123.
- [2] Ge M Z, Xiang J Y. Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 544-552.
- [3] Ge M Z, Xiang J Y, Tang Y, et al. Wear behavior of Mg-3Al-1Zn alloy subjected to laser shock peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 337: 501-509.
- [4] Ren X D, Zhou W F, Ren Y P, et al. Dislocation evolution and properties enhancement of GH2036 by laser shock processing: dislocation dynamics simulation and experiment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 184-192.
- [5] Kattoura M, Mannava S R, Qian D, et al. Effect of laser shock peening on elevated temperature residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 104: 366-378.
- [6] Amini S, Dadkhah M, Teimouri R. Study on laser shock penning of Incoloy 800 super alloy[J]. Optik, 2017, 140: 308-316.
- [7] Zhou L C, Long C B, He W F, et al. Improvement of high-temperature fatigue performance in the nickel-based alloy by LSP-induced surface nanocrystallization [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 156-164.
- [8] Cao J D, Zhang J S, Hua Y Q, et al. Microstructure and hot corrosion behavior of the Ni-based superalloy GH202 treated by laser shock processing[J]. Materials Characterization, 2017, 125: 67-75.
- [9] Tang Y, Ge M Z, Wang T M, et al. Effect of laser shock peening on fatigue life of GH3039 superalloy

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221402.
- 汤洋, 葛茂忠, 王太明, 等. 激光冲击处理对 GH3039 高温合金疲劳寿命的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 221402.
- [10] Zhou W, Ge M Z, Wang T M, et al. Effect of laser shock peening on surface integrity of GH3039 superalloys[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 031401.
- 周文, 葛茂忠, 王太明, 等. 激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 031401.
- [11] Zhang H F, Huang S, Sheng J, et al. Thermal relaxation of residual stress and grain evolution in laser peening IN718 alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203008.
- 章海峰, 黄舒, 盛杰, 等. 激光喷丸 IN718 镍基合金残余应力高温松弛及晶粒演变特征[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0203008.
- [12] Ananthakrishna G. Current theoretical approaches to collective behavior of dislocations[J]. *Physics Reports*, 2007, 440(4/5/6): 113-259.
- [13] Pfaendtner J A, McMahon C J, Jr. Oxygen-induced intergranular cracking of a Ni-base alloy at elevated temperatures: an example of dynamic embrittlement[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(16): 3369-3377.
- [14] Shu D L. *Metal mechanical properties*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- 束德林. *金属力学性能*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.